

Simulation of cotton growth stages using SSM-iCrop2 model

Ali Rahemi Karizaki^{1*}, Yaser Jafari Mofidabadi², Saeed Soltani²,
Mojtaba Salehi Sheikhi³

¹ Associate Professor, Department of Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad, Iran, Email: alirahemi@yahoo.com

² Researcher of National Cotton Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Gorgan, Iran

³ Ph.D. student of crop plant ecology, Gonbad Kavos University, Gonbad Kavos, Iran

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 6/1/2025
Accepted: 2/7/2025

Keywords:
Measurement
Yield
coefficient of variation
Vasanji

ABSTRACT

Background and purpose: Cotton is the most important natural fiber crop globally and in Iran, where approximately 90,000 hectares are cultivated annually. The main cotton-producing provinces include Razavi Khorasan, Fars, South Khorasan, Golestan, North Khorasan, Semnan, and Isfahan. Reliable crop simulation models are valuable tools for assessing crop performance under diverse environmental and management conditions. This study aimed to evaluate the SSM-iCrop2 model for simulating cotton phenological development and growth under the environmental conditions of Bandargaz city, Golestan province. In the SSM-iCrop2 model, various aspects of plant growth and development are represented through phenological subprograms. The model operates on a daily time step and requires detailed weather data (maximum and minimum temperature, radiation, and precipitation) along with agricultural management information (planting date and genotype).

Materials and methods: To evaluate the model's ability to simulate the developmental stages of newly introduced cotton varieties, a split-plot experiment based on a randomized complete block design with three replications was conducted at the Bandargaz Cotton Research Station during two growing seasons (2021–2022). The main factor was three planting dates, and the sub-factor consisted of six cotton genotypes. Each plot consisted of five 6-meter planting rows, with one non-planted row between treatments to minimize border effects. Model performance was evaluated by comparing simulated and observed values using root mean square error (RMSE), coefficient of variation (CV), correlation coefficient (R), and the proportion of data points falling within a $\pm 15\%$ deviation from the 1:1 line.

Results: Field observations showed that days to flowering ranged from 52 to 73 days, with a mean of 62.94 days, which was comparable to the model-predicted mean of 64.33 days. The RMSE for days to budding was 8.73 days, with a CV of 20.3% and a correlation coefficient of 0.76, indicating good agreement between simulated and observed values. For yield, the RMSE was 57.43 g m⁻², representing 19.7% of the observed mean yield. The correlation coefficient for yield

was 0.89, with 95% of the simulated values falling within $\pm 15\%$ of the 1:1 line. These findings confirm the model's accuracy in simulating both phenological stages and yield performance

Conclusion: The results demonstrated that the SSM-iCrop2 model provides acceptable accuracy for predicting cotton developmental stages, including budding, flowering, and ripening, as well as total yield under the climatic conditions of Bandargaz. The majority of simulated points were within the reliable range of $\pm 15\%$ of the 1:1 line, confirming the model's effectiveness and robustness in estimating crop parameters. Therefore, SSM-iCrop2 can be recommended as a practical tool for analyzing cotton productivity and for assessing the effects of environmental variation, management practices, and genetic factors in major cotton-growing regions of Iran.

Cite this article: Fooladmand, H.R. (2024). Evaluation of cotton water requirement in the southern part of Fars province. *Iranian Journal Cotton Researches*, 12 (2), 31-44.



© The Author(s).

DOI: 10.22092/ijcr.2025.368229.1231

Publisher: Cotton Research Institute of Iran



شبیه‌سازی مراحل نمو پنبه با استفاده از مدل SSM-iCrop2

علی راحمی کاریزکی^{۱*}، یاسر جعفری مفیدآبادی^۲، سعید سلطانی^۲، مجتبی صالحی شیخی^۳

^۱ دانشیار گروه تولیدات گیاهی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، گنبد، ایران، رایانامه: alirahemi@yahoo.com

^۲ محقق مؤسسه تحقیقات پنبه کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

^۳ دانشجوی دکتری اکولوژی گیاهان زراعی دانشگاه گنبد کاووس

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: پنبه مهم‌ترین منبع الیاف طبیعی در جهان و ایران به شمار می‌رود. سطح زیر کشت پنبه در ایران حدود ۹۰ هزار هکتار است. استان‌های خراسان رضوی، فارس، خراسان جنوبی، گلستان، خراسان شمالی، سمنان و اصفهان مناطق اصلی تولید پنبه در ایران هستند. هدف از این آزمایش ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی مراحل رشد گیاه پنبه در شرایط محیطی مختلف کشت در شهرستان بندرگز استان گلستان بود. جنبه‌های مختلف رشد و نمو گیاه در مدل SSM-iCrop2 به صورت زیر برنامه‌های نمو فنولوژیک، سازماندهی شده‌اند. مدل شبیه‌سازی را به صورت روزانه انجام می‌دهد و به اطلاعات مربوط به هوا (دمای حداکثر، دمای حداقل، تابش و بارش) و مدیریت زراعی (تاریخ کاشت، رقم) نیاز دارد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۱۱	مواد و روش‌ها: به منظور بررسی شبیه‌سازی مراحل نمو ارقام در دست معرفی پنبه با استفاده از مدل SSM-iCrop2، آزمایشی به صورت کرت های خرد شده در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تحقیقاتی پنبه کارکنده (بندرگز) به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۱ - ۱۴۰۰) اجرا گردید. تیمار های آزمایش تحت سه تاریخ کاشت به عنوان عامل اصلی و ۶ ژنوتیپ پنبه به عنوان عامل فرعی مورد بررسی قرار گرفتند. طول خطوط کاشت ۶ متر و تعداد خطوط ۵ خط می باشد و یک خط نکاشت هم بین تیمارها در نظر گرفته شد. در این مطالعه برای مقایسه انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مشاهده شده از میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات (CV)، ضریب همبستگی (R) و میزان انحراف نتایج شبیه‌سازی شده از خط ۱:۱ با طیفی از اختلاف ۱۵ درصد بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای آزمون نتایج مدل استفاده گردید.
واژه‌های کلیدی: واستجی عملکرد وش ضریب تغییرات	نتایج: نتایج این آزمایش نشان دهنده کارایی قابل قبول مدل، برای پیش‌بینی روز تا غنچه‌دهی ($RMSE = ۸/۷$, $CV = ۲۰/۳$, $R = ۰/۷۶$) و عملکرد وش ($RMSE = ۱۹/۷$, $R = ۰/۸۹$, $CV = ۹/۴$) بود. همچنین برای پارامترهای روز تا گلدهی ($RMSE = ۵۷/۴$, $R = ۰/۶۹$, $CV = ۱۱/۲$)، روز تا غوزه‌دهی ($RMSE = ۱۱/۲$, $R = ۰/۸۱$, $CV = ۱۱/۵$, $RMSE = ۹/۷$)، و روز تا رسیدگی ($RMSE = ۱۸/۹$, $CV = ۱۰/۸$, $R = ۰/۹۱$)، ارزیابی گردید.

نتیجه‌گیری: این نتایج نشان می‌دهد که مدل SSM-iCrop2 می‌تواند در مطالعات شبیه‌سازی عملکرد پنبه و واکنش آن به عوامل محیطی، مدیریتی و تغییرات اقلیم مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: راحمی کاریزکی، علی؛ جعفری مفیدآبادی، یاسر؛ سلطانی، سعید؛ صالحی شیخی، مجتبی. (۱۴۰۳). شبیه‌سازی مراحل نموی پنبه با استفاده از مدل SSM-iCrop2. *مجله پژوهش‌های پنبه / ایران*، ۱۲ (۲)، ۴۴-۳۱.

DOI: 10.22092/ijcr.2025.368229.1231



© نویسندگان.

ناشر: موسسه تحقیقات پنبه کشور

مقدمه

پنبه یکی از گیاهان مهم و استراتژیک در دنیا است که سابقه کشت بسیار طولانی در ایران و جهان دارد (قرنجیکی و فلاح نصرت آباد، ۲۰۲۰). افزایش تولید در واحد سطح و همچنین سطح زیر کشت این گیاه از اهداف اصلی محققان در طی سالیان گذشته بوده است. پنبه یکی از محصولات کشاورزی اساسی است که در تولید منسوجات و صنایع روغن استفاده می‌شود. این محصول اغلب به عنوان یکی از محصولات پرآب نام برده می‌شود و برای رشد و توسعه بهینه، نیازمند شرایط خاصی از خاک و آب و هوا است (وایت، ۲۰۱۷). یکی از راه کارهای اساسی در افزایش محصول پنبه در واحد سطح، استفاده صحیح از برنامه‌های مدیریتی مانند اتخاذ سیستم‌های صحیح خاکورزی و کودهای زیستی، تاریخ کاشت و تراکم مناسب است (وییلر و همکاران، ۲۰۲۰؛ ناگراال و همکاران، ۲۰۲۳).

مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی به درک فعلی ما از فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه (فنولوژی، تولید و توزیع ماده خشک) و همچنین پاسخ‌های گیاه به عوامل محیطی را به صورت روابط کمی ریاضی کمک کرده (سلطانی و سینکدر، ۲۰۱۲) و به گونه‌ای طراحی شده‌اند که بتوانند روابط متقابل ژنتیک، محیط و عوامل مدیریتی را به خوبی نشان دهند. به نظر می‌رسد در صورت فراهم بودن آمار هواشناسی بلند مدت، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تخمین بهتری از عملکرد پتانسیل در شرایط دیم و آبی نسبت به سایر روش‌ها می‌دهند. دلایل و مزایای کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی که جزء مدل‌های پویا محسوب می‌شوند شامل کاهش آزمایش‌های درازمدت مزرعه‌ای در یک منطقه خاص و برآورد بهتر عملکرد پتانسیل در شرایط دیم و آبی نسبت به مزارع آزمایشی و یا حداکثر عملکرد کشاورزان؛ امکان حذف اثرات آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز در شبیه‌سازی‌ها؛ ارزیابی تأثیر عملیات مدیریت زراعی بر عملکرد؛ شناخت بهتر از سیستم‌های بیولوژیکی و فیزیکی و اثرات متقابل آن‌ها؛ تخمین واقعی‌تر عملکرد پتانسیل، رژیم رطوبتی و مدیریت و نیز ارزیابی دقیق‌تر راه‌های افزایش عملکرد از

طریق تغییر مدیریت‌های مختلف زراعی و شناخت بهتر تأثیر فاکتورهای مدیریتی مختلف از قبیل تاریخ کاشت، تراکم، رقم و غیره می‌باشند (سیلوان و گیلر، ۲۰۲۰). امروزه مدل‌های متفاوتی برای برآورد عملکرد پتانسیل، براساس روش‌های مختلف محاسبه، از قبیل محاسبه ماده خشک خالص، فتوسنتز و تبخیر و تعرق توسعه داده شده‌اند. از میان این مدل‌ها می‌توان به مدل پتانسیل حرارتی-تابشی تولید (سیس و همکاران، ۱۹۸۵)، مدل WOFOST (دایپن و همکاران، ۱۹۸۹)، مدل DSSAT (جونز و همکاران، ۲۰۰۳)، مدل EPIC (ویلیامز و همکاران، ۱۹۸۹) و مدل Aqua crop (رییس و همکاران، ۲۰۰۹) اشاره کرد. برای پیش‌بینی رشد و نمو گیاه راهبردی پنبه مدل‌های مختلفی از قبیل GOSSYM (باکر و همکاران، ۱۹۸۳)، OZCOT (هرن و همکاران، ۱۹۹۴) و COTCROP (Brown, et al 1985) ارائه شده است. مدل EPIC را برای شبیه‌سازی رشد پنبه در جنوب تگزاس پارامتریابی کردند. در مطالعه آن‌ها مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای عملکرد پنبه شبیه‌سازی شده در مقابل عملکرد مشاهده شده برابر ۲۲۰ کیلوگرم در هکتار و مقدار ضریب تبیین (r^2) برابر ۸۶ درصد به دست آمد (کوو و همکاران، ۲۰۰۹). در مطالعه ای بر روی مدل Aqua Crop مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای عملکرد پنبه شبیه‌سازی شده در مقابل عملکرد مشاهده شده برابر ۱۳۰ کیلوگرم در هکتار و مقدار ضریب تبیین (r^2) برابر ۹۸ درصد به دست آمد (فراهانی و همکاران، ۲۰۰۹). در مطالعه‌ای دیگر (تین و همکاران، ۲۰۱۸) عملکرد مدل Aqua Crop را برای شبیه‌سازی رشد پنبه در جنوب سین کیانگ چین مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای عملکرد پنبه شبیه‌سازی شده در مقابل عملکرد مشاهده شده در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ به ترتیب برابر ۶۴۴ و ۱۳۱۹ کیلوگرم در هکتار و مقدار ضریب تبیین (r^2) به ترتیب برابر ۹۶ و ۸۵ درصد به دست آمد. علاوه بر مدل‌های ذکر شده مدل دیگری به نام

زیادی نیز وجود ندارد (سلطانی و همکاران، ۲۰۱۱). مراحل فنولوژی در مدیریت مزرعه مانند آبیاری، مصرف علف‌کش‌ها، کودهای شیمیایی و دیگر نهاده‌ها برای دستیابی به حداکثر عملکرد نقش مهمی دارند. از آنجایی که آزمایشات مزرعه‌ای غالباً وقت‌گیر و پرهزینه است، لذا هدف از این آزمایش ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی مراحل رشد گیاه پنبه در شرایط محیطی مختلف کشت در شهرستان بندرگز استان گلستان بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش مزرعه‌ای: به منظور بررسی شبیه‌سازی مراحل نمو ارقام در دست معرفی پنبه با استفاده از مدل SSM-iCrop2، آزمایشی به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تحقیقاتی پنبه کارکنده (بندرگز) واقع در ۳۵ کیلومتری غرب گرگان به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۱ - ۱۴۰۰) اجرا گردید. تیمارهای آزمایش تحت سه تاریخ کاشت، شامل (۵ اردیبهشت، ۲۵ اردیبهشت و ۱۴ خرداد) به عنوان عامل اصلی و ۶ ژنوتیپ پنبه (N2G80 - NSK847 - NBK-ANBK - 96A3 - GKTB113 و یک رقم شاهد) به عنوان عامل فرعی مورد بررسی قرار گرفت. آماده‌سازی زمین با توجه به روش‌های متداول خاکورزی موجود در منطقه (شخم و دیسک بهاره) انجام گردید. آمار هواشناسی در طی دوره کشت در جدول ۱ قابل مشاهده است.

SSM-iCrop2 توسط سلطانی و همکاران (۲۰۱۳) برای شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل گیاهان زراعی مختلف تهیه شده است. این مدل توانایی شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک (سبز شدن، شروع مؤثر پر شدن دانه، پایان مؤثر پر شدن دانه، شروع پیر شدن برگ و رسیدگی)، گسترش و پیری برگ، توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد. این مدل دارای کد باز بوده و چون دارای ساختار ساده است برای اهداف آموزشی نیز قابل استفاده است. از آن جایی که مدل از صفحه گسترده اکسل برای ورودی و خروجی استفاده می‌کند کار با آن ساده است. از این مدل می‌توان در موارد متعددی نظیر کاربردهای تحقیقاتی، مدیریت زراعی و آموزشی استفاده نمود (Soltani, et al 2020). تاکنون مدل SSM برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان مختلف مثل سویا (رسام و سلطانی، ۱۳۹۳)، سورگوم (راحی کاریزی و همکاران، ۲۰۲۲)، نخود (راحی کاریزی و همکاران، ۲۰۲۱)، بادام‌زمینی (نورحسینی و همکاران، ۲۰۱۸) و سیب‌زمینی (داری و همکاران، ۲۰۲۰) پارامتریابی و ارزیابی شده است.

پیش‌بینی نمو فنولوژیک یا مراحل نمو گیاه اهمیت زیادی دارد، چون تولید و توزیع ماده خشک در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تا حد زیادی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژی می‌باشد. به همین ترتیب، پیش‌بینی آن نسبت به پیش‌بینی تغییرات سطح برگ و سایر فرایندها نسبتاً مشکل‌تر است، زیرا تفاوت بین گونه‌ها و ارقام زیاد است و اطلاعات کمی

جدول ۱- آمار هواشناسی ایستگاه تحقیقات کارکنده در دو سال آزمایش (۱۴۰۰-۱۴۰۱)

	بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)		مجموع ساعات آفتابی (ساعت) Total hours of sunshine (hour)		میانگین دما (°C) Temperature mean	
فروردین (March)	26.2	21.1	205.7	177.7	18.6	21.5
اردیبهشت (April)	32.0	48.2	240.1	177.5	23.3	22.2
خرداد (May)	17.4	12.2	289.0	323.0	۲۷/۶	26.9
تیر (June)	3.2	11.1	207.7	176.6	32.6	31.5
مرداد (July)	12.0	28.2	240.1	147.5	31.5	29.9
شهریور (Aug)	23.4	22.6	180.0	190.0	29.4	28.8

متر مربع رسید. برداشت محصول در سه خط وسط از هر کرت به طول ۵ متر انجام شد. همچنین آبیاری با استفاده از نوارهای مخصوص (Tape) صورت گرفت و برای مبارزه با علف‌های هرز نیز از روش وجین دستی استفاده گردید. عملیات یادداشت برداری هر پلات روی میزان عملکرد و صفات فنولوژیکی شامل روز تا غنچه‌دهی، روز تا گلدهی، روز تا غوزه‌دهی و روز تا رسیدگی صورت پذیرفت. برای مبارزه با آفات مکنده و کرم غوزه، از سومو تایدیفیت و لاروین استفاده شد.

بافت خاک محل اجرای پروژه از نوع سیلتی لوم با مشخصات ۸۵-۶۵ درصد سیلت، ۱۵-۱۰ درصد شن و ۱۴-۲۰ درصد رس بود و افزودن عناصر مغذی به خاک مزرعه (۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم) بر اساس آزمون خاک (از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) انجام شد (جدول ۲). در این پروژه، ارقام مورد مطالعه در پلات‌هایی با ابعاد ۶ خط (۵ خط کاشت و یک خط نکاشت) در ۶ متر و فواصل ۲۰×۸۰ سانتی‌متر کشت شدند، که هر پلات به مساحت ۱۶

جدول ۲- مشخصات خاک محل اجرای آزمایش

ویژگی‌ها (Characteristic)	مقدار (Amount)
هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	0.83
اسیدیته (pH)	6.1
کربن آلی Organic C (%)	1.23
نیتروژن N (ppm)	0.21
فسفر قابل جذب Absorbable phosphorus (ppm)	11
پتاسیم قابل جذب Absorbable potassium (ppm)	210

نیاز اطلاق می‌شود.

بررسی کارایی مدل: در این آزمایش برای مقایسه انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مشاهده شده از میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات (CV)، ضریب همبستگی (r) و میزان انحراف نتایج شبیه‌سازی شده از خط ۱:۱ با طیفی از اختلاف ۲۰٪ بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده، برای آزمون نتایج مدل براساس معادلات زیر استفاده شد.

$$\text{RMSE}(\%) = \sqrt{\frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{n-1}} \times \frac{100}{\bar{X}} \quad (۱)$$

که در آن X_i : مقدار اندازه‌گیری شده، Y_i : مقدار شبیه‌سازی شده و n : تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است که برای محاسبه RMSE استفاده می‌شوند.

$$\text{CV} = \frac{\delta}{\mu} \times 100 \quad (۲)$$

که در آن CV: ضریب تغییرات، δ : انحراف معیار و μ : میانگین می‌باشد.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (۳)$$

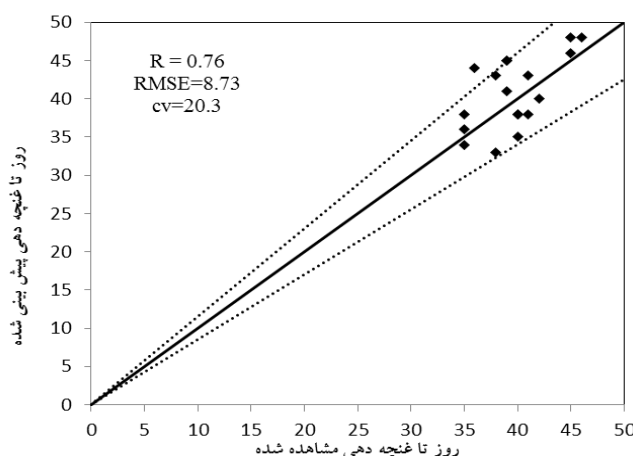
ساختار مدل: زیر مدل iCrop2 برگرفته از مدل اصلی SSM می‌باشد که در آن مقدار عملکرد پتانسیل بر مبنای داده‌های هواشناسی، شرایط خاک، نحوه مدیریت و پارامترهای گیاهی محاسبه می‌شود. مدل شبیه‌سازی را به صورت روزانه انجام می‌دهد و از اطلاعات قبل دسترس آب و هوا و خاک استفاده می‌کند (سلطانی و سینکلی، ۲۰۱۲). در پنبه فنولوژی گیاه، تغییرات سطح برگ، تولید و توزیع ماده خشک، از مهم‌ترین مراحل هستند که در مدل باید شبیه‌سازی شوند. از آنجایی که این مدل از صفحات برنامه اکسل شرکت مایکروسافت برای ورود و خروجی استفاده می‌کند، کار با آن ساده است. در این مدل، روش کمی‌سازی پیش‌بینی نمو فنولوژیکی در پنبه تابعی از دما، طول دوره رشد رویشی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مدل می‌توان واحد دمایی تجمعی مورد نیاز برای یک مرحله را بر حسب تعداد روز تقویمی مورد نیاز برای آن مرحله فنولوژیک بیان کرد که اصطلاحاً به آن روز زیستی (روز بیولوژیک) مورد

که در آن X_i : مقدار اندازه‌گیری شده، Y_i : مقدار شبیه‌سازی شده، $\bar{X}$ و $\bar{Y}$: میانگین مقادیر X_i و Y_i و n : تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است که برای محاسبه r استفاده می‌شوند.

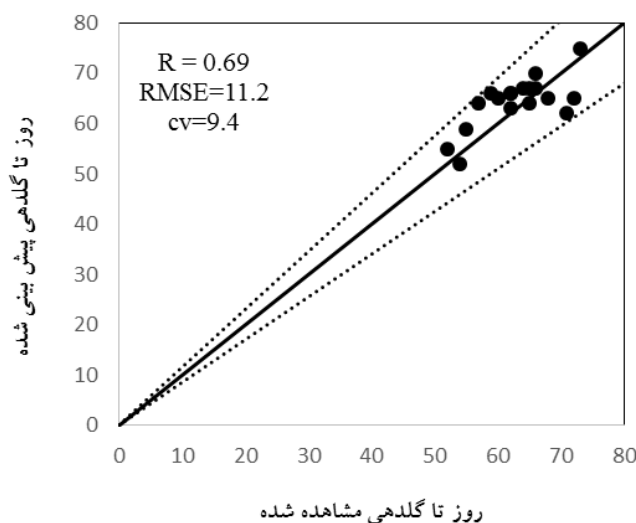
نتایج

روز تا شروع غنچه دهی: نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای روز تا غنچه دهی $8/73$ روز است و ضریب تغییرات (CV) بین مقادیر شبیه‌سازی شده و

مشاهده شده برای روز تا غنچه دهی $20/3$ درصد بود. ضریب همبستگی روز تا غنچه‌دهی شبیه‌سازی شده با روز تا مشاهده شده ($0/76$) نیز نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی دقیق مراحل نمو فنولوژیک موفق بوده است. همچنین نتایج نشان داد که مقادیر روز تا غنچه دهی به‌دست آمده از مزرعه (مشاهده شده)، در یک محدوده‌ای از مقادیر 35 تا 46 روز و میانگین $39/66$ روز، در مقایسه با مقدار میانگین به‌دست آمده از مدل ($40/72$) نشان دهنده این موضوع بود که تقریباً اکثر داده‌ها در دامنه‌ای مشابه با مقادیر واقعی قرار دارند (شکل ۱).



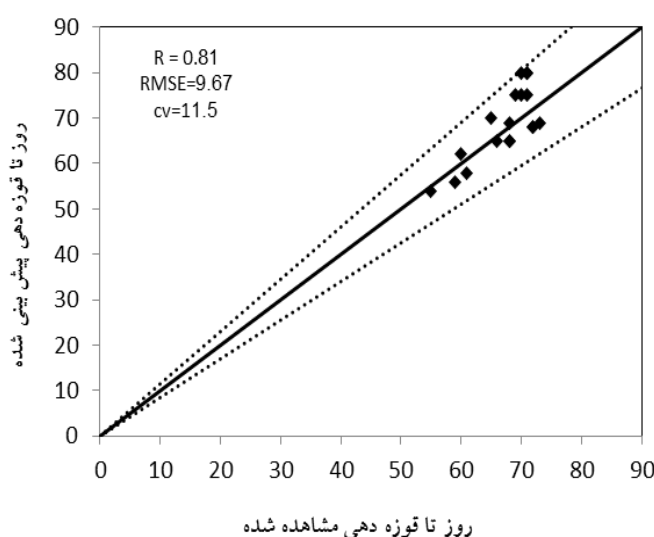
شکل ۱- مقادیر روز تا غنچه‌دهی مشاهده شده در مقابل روز تا غنچه‌دهی شبیه‌سازی شده (خط تیره، معرف خط ۱:۱ و خطوط نقطه چین بالا و پایین بیانگر ± 15 درصد می‌باشد)



شکل ۲- مقادیر روز تا گلدهی مشاهده شده در مقابل روز تا گلدهی شبیه‌سازی شده (خط تیره، معرف خط ۱:۱ و خطوط نقطه چین بالا و پایین بیانگر ± 15 درصد می‌باشد).

روز تا شروع گلدهی: نتایج نشان داد که مقادیر روز تا گلدهی به‌دست آمده از مزرعه در محدوده‌ای از ۵۲ تا ۷۳ روز و میانگین ۶۲/۹۴ روز به‌دست آمد که در مقایسه با مقدار میانگین حاصل شده از مدل (۶۴/۳۳) به این نتیجه می‌توان رسید که تمام نقاط در دامنه‌ای مشابه با مقادیر پیش‌بینی شده قرار دارد. همچنین در این صفت، پارامترهای جذر میانگین مربعات خطا، ضریب تغییرات و ضریب همبستگی، به‌ترتیب برابر ۱۱/۲، ۹/۴ و ۰/۶۹ محاسبه شد، که همگی نشان‌دهنده پیش‌بینی مطلوب مدل می‌باشد (شکل ۲).

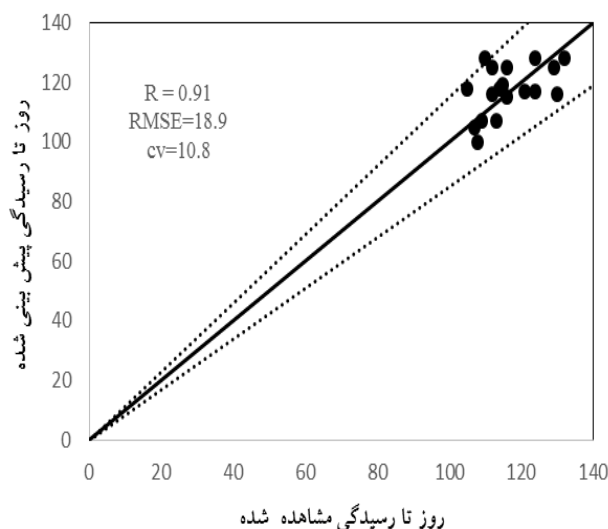
روز تا شروع غوزه‌دهی: در شکل ۳ روز تا غوزه‌دهی



شکل ۳- مقادیر روز تا قوزه‌دهی مشاهده شده در مقابل روز تا غوزه‌دهی شبیه‌سازی شده (خط تیره، معرف خط ۱:۱ و خطوط نقطه چین بیانگر دامنه ± 15 درصد می‌باشد).

میانگین مربعات خطا، ضریب تغییرات و ضریب همبستگی، بین داده‌های به‌دست آمده از آزمایشات مزرعه‌ای و داده‌های شبیه‌سازی شده از مدل به‌ترتیب ۱۸/۹، ۱۰/۸ و ۰/۹۱ به‌دست آمد. مقایسه داده‌های حاصل مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نسبت به خط ۱:۱ در محدوده ± 15 درصد این خط قرار گرفتند (شکل ۴) که بیانگر پیش‌بینی موفق مدل برای شبیه‌سازی مرحله فنولوژیکی روز تا پایان انتهای دوره رویشی پنبه بود.

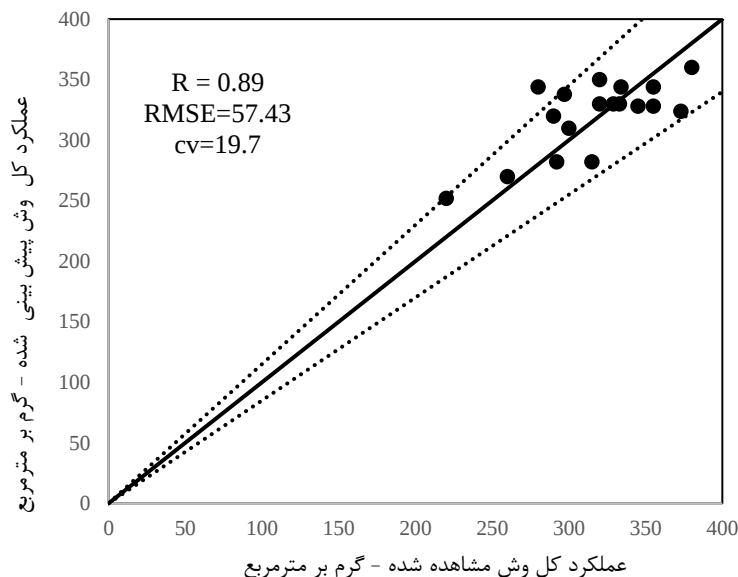
روز تا شروع رسیدگی: نتایج نشان می‌دهد که مدل، روز از کاشت تا شروع رسیدگی را نیز به‌خوبی شبیه‌سازی نموده به‌نحوی که مقادیر روز تا رسیدگی به‌دست آمده از مزرعه (مشاهده شده) در یک محدوده‌ای از مقادیر ۱۰۷ تا ۱۳۲ روز و میانگین ۱۱۶/۵۰ روز به‌دست آمد که در مقایسه با مقدار میانگین حاصله از مدل (۱۱۷/۴۴) نشان داد که در دامنه‌ای مشابه با مقادیر واقعی است. همچنین جذر



شکل ۴- مقادیر روز تا رسیدگی مشاهده شده در مقابل روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده (خط تیره، معرف خط ۱:۱ و خطوط نقطه چین بیانگر دامنه ± 15 درصد می‌باشد)

نقاط در محدوده خطوط ± 15 درصد نسبت به خط ۱:۱ می‌باشند. که نشان از پیش‌بینی درست پارامترهای مدل دارد. استفاده از مدل‌های ریاضی یکی از کاربردی‌ترین روش‌های پیش‌بینی عملکرد محصولات گیاهان زراعی است که در سال‌های اخیر استفاده گسترده‌ای در پیش‌بینی تولید محصولات زراعی همچون پنبه داشته است (شو و همکاران، ۲۰۲۰).

عملکرد کل وش: نتایج این آزمایش نشان داد که جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مقدار عملکرد وش پنبه در شهرستان بندرگز طی دو سال ۵۷/۴۳ گرم در متر مربع است که حدود ۱۹/۷ درصد میانگین عملکرد مشاهده شده است. همچنین در این آزمایش ضریب همبستگی ۰/۸۹ به دست آمد و همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود ۹۵ درصد



شکل ۵- مقادیر عملکرد کل مشاهده شده در مقابل عملکرد کل شبیه‌سازی شده (خط تیره، معرف خط ۱:۱ و خطوط نقطه چین بیانگر دامنه ± 15 درصد می‌باشد).

بحث

استفاده از مدل‌های ریاضی یکی از تکنیک‌های دقیق و کارآمد در پیش‌بینی عملکرد و مراحل فنولوژیکی گیاه است. زمان کاشت تا شروع غنچه‌دهی از خصوصیات فنولوژیکی مهم پنبه است که در برنامه‌های مدیریتی اصلاحی و مبارزه با آفات و بیماری‌ها بسیار با اهمیت است (شیا و همکاران، ۲۰۱۹). داشتن سرعت رشد بالا و رسیدن به مرحله غنچه‌دهی یک مزیت مهم در پنبه است، چرا که مراحل اولیه رشد این گیاه نسبت به آفات و بیماری‌ها حساس است (نعیم الله و همکاران، ۲۰۲۰). داشتن جذر میانگین مربعات خطای کم و ضریب همبستگی مطلوب نشان از قدرت مدل در پیش‌بینی این صفت فنولوژیکی است. پیش‌بینی شروع گلدهی توسط مدل‌های ریاضی از اهمیت ویژه‌ای برای محققان و کشاورزان برخوردار است، چرا که بیشتر برنامه‌های مدیریتی همچون استفاده از عناصر مغذی و یا مبارزه با آفات و بیماری‌ها در این مرحله انجام می‌شود (سارود و همکاران، ۲۰۲۰؛ محمد و همکاران، ۲۰۲۰).

گلدهی یکی از مهمترین مراحل رشد و نمو گیاه است که بیشترین نیاز فیزیولوژیکی گیاه در این مرحله اتفاق می‌افتد (ژیلنگ و همکاران، ۲۰۲۰). محققان بر این باورند که پس از مرحله جوانه‌زنی و استقرار، گلدهی یکی از حساس‌ترین مراحل به آفات و بیماری‌ها است که تهیه مدل‌های آماری برای پیش‌بینی این مرحله از اولویت‌های اصلی بخش کشاورزی است (لئو و همکاران، ۲۰۲۱؛ دالیوال و همکاران، ۲۰۲۲). غوزه‌دهی یکی از مراحل مهم چرخه زندگی پنبه است که تحت تأثیر ژنتیک و شرایط محیطی می‌تواند تغییر یابد. پیش‌بینی زمان دقیق تشکیل غوزه از نظر مدیریت تغذیه گیاه برای نیل به افزایش کیفیت الیاف پنبه دارای اهمیت است (شو و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، پیش‌بینی زمان غوزه‌دهی در پی بردن به پتانسیل عملکرد و تعیین زمان برداشت پنبه دارای اهمیت زیادی است شروع رسیدگی با باز شدن کامل غوزه‌ها همراه است و به تدریج نیتروژن و سایر مواد معدنی از برگ‌های پایینی به برگ‌های بالایی و در

نهایت به سمت غوزه‌ها گسیل می‌شوند (لین و همکاران، ۲۰۲۳). تعیین زمان دقیق این مرحله فنولوژیکی برای دستیابی به عملکرد و کیفیت مطلوب پنبه بسیار با اهمیت است. وقوع بارش‌های فصلی یکی از مشکلات اساسی در این مرحله از رشد پنبه است که با استفاده از مدل‌های آماری و پیش‌بینی زمان رسیدگی، می‌توان کمیت و کیفیت پنبه‌های تولیدی را بهبود داد (لئو و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده از مدل‌های ریاضی یکی از کاربردی‌ترین روش‌های پیش‌بینی عملکرد محصولات گیاهان زراعی است که در سال‌های اخیر استفاده گسترده‌ای در پیش‌بینی تولید محصولات زراعی همچون گیاه پنبه داشته است (پراساد و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده از مدل SSM-iCrop2 یکی از بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی عملکرد گیاهان زراعی است که به دلیل دخیل بودن پارامترهای مختلف محیطی در آن، دارای دقت بسیار بالایی می‌باشد (سلطانی و همکاران، ۲۰۲۰). همانند نتایج این پژوهش، استفاده از مدل SSM-iCrop2 در پیش‌بینی عملکرد گیاهان زراعی مختلف، مؤثر بوده است (حسینی و همکاران، ۲۰۲۱؛ نه‌بندانی و همکاران، ۲۰۲۳). در پارامتریابی مدل SSM-iCrop2 برای برنج، مقایسه بین روز تا رسیدگی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، با RMSE، و CV به‌ترتیب برابر با ۱۲ روز، ۱۱ درصد و ۰/۶۱ و برای عملکرد دانه به ترتیب ۵۶ گرم در متر مربع، ۲۱ درصد و ۰/۸۰ درستی پارامترهای مورد استفاده را نشان داد (کرامت و همکاران، ۲۰۲۳). در مطالعه ایشان مقدار RMSE برای عملکرد پنبه برابر با ۷۷/۶ گرم در متر مربع و حدود ۱۳ درصد میانگین عملکرد بود. در مطالعه ایشان ضریب همبستگی شبیه‌سازی شده و گزارش شده برابر با ۰/۷۲ بود. طی یک مطالعه استفاده از مدل SSM-iCrop2 فنولوژی، عملکرد کلزای آبی را پیش‌بینی کردند. ایشان با توجه به مقادیر آماره‌های مربوطه (r^2 ، CV، RMSE) کارایی مدل در شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزای آبی را رضایت‌بخش دانستند. در مطالعه ایشان مقادیر ضریب تبیین، ضریب تغییرات و جذر میانگین مربعات خطا برای عملکرد دانه کلزا به‌ترتیب ۰/۸۷، ۱۸، درصد

و ۶۷ گرم در متر مربع گزارش شد. در مطالعه ی دیگر پارامترهای گیاهی و ارزیابی عملکرد علوفه یونجه با استفاده از مدل iCrop-SSM2 در مناطق عمده تولید آن در ایران بررسی شد. نتایج ارزیابی مطالعه ایشان نشان داد، ضریب همبستگی (r^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تغییرات (CV) برای عملکرد تک چین شبیه‌سازی شده در مقایسه با مشاهده شده به‌ترتیب ۰/۷۹، ۸۸/۳ گرم در متر مربع و ۲۶/۷۸ درصد، برای عملکرد علوفه سالانه به‌ترتیب ۰/۹۰، ۴/۳۴۴ گرم در متر مربع به‌دست آمد (پورشیرازی و همکاران، ۲۰۲۳). نتایج مدل شبیه‌سازی SSM-iCrop2 برای پیش‌بینی پویایی و رشد و نیتروژن ارقام زمستانه گندم (*maestivu Triticum*) در بخشی از منطقه اتریش با شرایط آب و هوایی معتدل مورد ارزیابی قرار گرفت که دوره زمانی شبیه‌سازی شده ویژگی‌های محصول در طول فصل رشد، مطابقت خوبی با داده‌های مشاهده شده نشان داد. مقادیر CV و RMSE برای ماده خشک به‌ترتیب ۵/۹ درصد و ۱۱۵/۶ گرم در متر مربع و برای عملکرد دانه ۱/۹ درصد و

۶۰/۵ گرم در متر مربع بود (منشادی و همکاران، ۲۰۲۲).

نتیجه گیری

نتایج این آزمایش نشان از کارایی قابل قبول مدل SSM-iCrop2 برای پیش‌بینی روز تا غنچه دهی، روز تا گلدهی، روز تا غوزه‌دهی، روز تا رسیدگی و عملکرد کل وش در شرایط آب و هوایی شهرستان بندرگز داشت. همچنین ارزیابی مدل نشان داد در اکثر نقاط در محدوده قابل اطمینان (± 15 درصد) از خط یک و یک قرار گرفتند که بیانگر برآورد صحیحی از پارامترهای مدل و یا تصدیق‌کننده کارایی شبیه‌سازی مراحل رشد مدل است. بنابراین، می‌توان از این مدل برای اهداف تجزیه و تحلیل عملکرد پنبه و بررسی واکنش پنبه به تغییرات محیطی، مدیریتی و عوامل ژنتیکی در در مناطق مهم تولید کننده پنبه در کشور استفاده نمود.

منابع

1. Amir, J., and Sinclair, T. 1991. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. Field Crops Research. 28: 59-69.
2. Baker, D. N., Lambert, J. R., and McKinion, J. M. 1983. GOSSYM: A simulator of cotton crop growth and yield. Tech Bull., 1086, S. C. Agricultural Experiment Station, Clemson, South Carolina, USA.
3. Brown, L. G., Jones, J. W., Hesketh, J. D., Hartsog, J. D., Whisler, F. D., and Harris, F. S. 1985. COTCROP: Computer simulation of growth and yield. Mississippi Agricultural and Forestry Experiment Station, Information Bulletin No 69. Mississippi State, USA.
4. Dadrasi, A., Torabi, B., Rahimi, A., Soltani, A., Zeinali, E. 2020. Parameterization and Evaluation of a Simple Simulation Model (SSM-iCrop2) for Potato (*Solanum tuberosum* L.) Growth and Yield in Iran. Potato Research. 63: 545–563.
5. Dai, J. and Dong, H., 2016. Farming and cultivation technologies of cotton in China. Cotton Research, 77: 97.
6. Dhaliwal, J.K., Panday, D., Saha, D., Lee, J., Jagadamma, S., Schaeffer, S., and Mengistu, A., 2022. Predicting and interpreting cotton yield and its determinants under long-term conservation management practices using machine learning. Computers and Electronics in Agriculture. 199: 107107.
7. Diepen, C. V., Wolf, J., Keulen, H. V., and Rappoldt, C. 1989. WOFOST: A simulation model of crop production. Soil use and management. 5 (1): 16-24.
8. Farahani, H. J., Izzi, G., Oweis, T. Y. 2009. Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. Agronomy Journal. 101 (3): 469-476.

9. Gharanjiki, A., and Fallah, A. 2023. Nosrat-abad Field evaluation of different levels of nitrogen and growth promoting bacteria on yield and yield components of cotton in delayed cultivation. Iranian cotton researches. 7(2): 75-92. (In Persian).
10. Hearn, A. B. 1994. OZCOT: A simulation model for cotton crop management. Agricultural Systems. 44: 257-299.
11. Hosseini, R.A., Soltani, A., Ajamnoroozi, H. and Zahed, M., 2021. The impact of climate change on rain-fed wheat yield in Iran. Arabian Journal of Geosciences. 14: 1-11.
12. Jiang, Y., Li, C., Xu, R., Sun, S., Robertson, J.S. and Paterson, A.H., 2020. DeepFlower: a deep learning-based approach to characterize flowering patterns of cotton plants in the field. Plant methods, 16, pp.1-17.
13. Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., .., Ritchie, J. T. 2003. The DSSAT cropping system model. European journal of agronomy. 18(3): 235-265.
14. Keramat, S., Torabi, B., Soltani, A., and Zeinali, E. 2023 Parameterization and evaluation of SSM-iCrop2 model to simulate the growth and yield of rice in Iran. Journal of Plant Production Research. 30(1): 21-47. (in Persian with English Abstract).
15. Ko, J., Piccinni, G., Guo, W., and Steglich, E. 2009. Parameterization of EPIC crop model for simulation of cotton growth in South Texas. Journal of Agricultural Science. 147: 169-178. doi: 10.1017/S0021859608008356.
16. Leo, S., De Antoni Migliorati, M., and Grace, P.R., 2021. Predicting within-field cotton yields using publicly available datasets and machine learning. Agronomy Journal, 113(2): 1150-1163.
17. Lin, S., Deng, M., Wei, K., Wang, Q., and Su, L., 2023. A new regional cotton growth model based on reference crop evapotranspiration for predicting growth processes. Scientific Reports, 13(1): 7368.
18. Muhammad, W., Ahmad, M., and Ahmad, I., 2020. Pollination behavior of cotton crop and its management. Cotton Production and Uses: Agronomy, Crop Protection, and Postharvest Technologies, pp.163-175.
19. Naeem-Ullah, U., Ramzan, M., Bokhari, S.H.M., Saleem, A., Qayyum, M.A., Iqbal, N., Habib ur Rahman, M., Fahad, S., and Saeed, S., 2020. Insect pests of cotton crop and management under climate change scenarios. Environment, climate, plant and vegetation growth. 367-396.
20. Nagrale, D.T., Chaurasia, A., Kumar, S., Gawande, S.P., Hiremani, N.S., Shankar, R., Gokte-Narkhedkar, N., and Prasad, Y.G., 2023. PGPR: the treasure of multifarious beneficial microorganisms for nutrient mobilization, pest biocontrol and plant growth promotion in field crops. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(4): 100.
21. Nehbandani, A., Filippi, P., Alizadeh-Dehkordi, P., Dadrasi, A., and Soltani, A., 2023. Use of interpretive machine learning and a crop model to investigate the impact of environment and management on soybean yield gap. Crop and Pasture Science, 75(1): NULL-NULL.
22. Noorhosseini, S. A., Soltani, A., Ajamnoroozi, H. 2018. Simulating peanut (*Arachis hypogaea* L.) growth and yield with the use of the Simple Simulation Model (SSM). Computers and Electronics in Agriculture. 145: 63-75.
23. Prasad, N.R., Patel, N.R. and Danodia, A., 2021. Crop yield prediction in cotton for regional level using random forest approach. Spatial information research, 29: 195-206.
24. Qin, A., Aluko, O.O., Liu, Z., Yang, J., Hu, M., Guan, L. and Sun, X., 2023. Improved cotton yield: Can we achieve this goal by regulating the coordination of source and sink?. Frontiers in Plant Science, 14: p.1136636.
25. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., and Fereres, E. 2009. AquaCrop Reference Manual. FAO. Land and Water Division, Rome, Italy.
26. Rahemi Karizaki, A., Kouhkan, H., Feyzbakhsh, M. T., and Khaliliaqdam, N. 2023. Simulation of phenological development and growth duration in sorghum (*Sorghum bicolor* L.) using SSM-iSorghum Model (Case Study: Gorgan County). Journal of Agroecology, 14(4): 713-729. (in Persian with English Abstract).

27. Rahemi karizaki, A., Sanaie, K., Nakhzari Moghaddam, A., Golamalipour Alamdari, E., Pirdehghan, S. and Habibian, L. 2022. The effect of climate change pheological traits of chick pea (*Cicer arietinum* L.) under rainfeild and irrigated conditions Gonbad. *Crop production*, 15(1): 57-72. (In Persian).
28. Rasam, Q. Soultani, A. 2014. A simple model to simulate growth and yield of soybean. *Journal of plant production research*. 21(2): 87-105 (in Persian with English Abstract).
29. Santoyo, G., Urtis-Flores, C.A., Loeza-Lara, P.D., Orozco-Mosqueda, M.D.C., and Glick, B.R., 2021. Rhizosphere colonization determinants by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). *Biology*, 10(6), p.475.
30. Sarode, A.D., Zanwar, P.R., Matre, Y.B., and Latpate, C.B., 2020. Seasonal incidence of major insect pests and their correlation with weather parameters in cotton. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 8(4), pp.1371-1374.
31. Silva, J.V. and Giller, K.E., 2020. Grand challenges for the 21st century: what crop models can and can't (yet) do. *The Journal of Agricultural Science*, 158(10), pp.794-805.
32. Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A. Z., E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., and Hosseini, R.S. 2020. SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, 182, p.102855.
33. Soltani, A., and Sinclair, T. 2015. A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: Simulation in a temperate, sub-humid environment. *Field Crops Research*. 175: 37–46.
34. Soltani, A., and Sinclair, T. R. 2011. A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research*. 124: 252-260.
35. Soltani, A., and Sinclair, T. R. 2012. *Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield*. CABI Publishing, Wallingford, UK.
36. Soltani, A., Maddah, V., and Sinclair, T. R. 2013. SSM-Wheat: A simulation model for wheat development, growth and yield. *International Journal of Plant Production*. 7: 711-740.
37. Sys, C., Van Ranst, E., Debaveye, J., and Beernaert, F. 1985. Land evaluation. State University of Ghent, International Training Centre for postgraduate soil scientists.
38. Tan, S., Wang, Q., Zhang, J., Chen, Y., Shan, Y., and Xu, D. 2018. Performance of AquaCrop model for cotton growth simulation under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang, China. *Agricultural Water Management*. 196: 99-113.
39. Wheeler, T.A., Bordovsky, J.P., Keeling, J.W., Keeling, W., and McCallister, D., 2020. The effects of tillage system and irrigation on Verticillium wilt and cotton yield. *Crop Protection*, 137, p.105305.
40. White, L. 2017. Effects of different soil management techniques on cotton fiber characteristics. *Journal of Sustainable Agriculture*, 8(2), 67-78
41. Williams, J. R., Jones, C. A., Kiniry, J. R., and Spanel, D. A. 1989. The EPIC crop growth model. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 32: 497-510.
42. Xia, L., Zhang, R., Chen, L., Huang, Y., Xu, G., Wen, Y., and Yi, T., 2019. Monitor cotton budding using SVM and UAV images. *Applied Sciences*, 9(20), p.4312.
43. Xu, W., Chen, P., Zhan, Y., Chen, S., Zhang, L., and Lan, Y., 2021. Cotton yield estimation model based on machine learning using time series UAV remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 104, p.102511.
44. Xu, W., Yang, W., Chen, S., Wu, C., Chen, P., and Lan, Y. 2020. Establishing a model to predict the single boll weight of cotton in northern Xinjiang by using high resolution UAV remote sensing data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, p.105762.